

灵敏度分析和SVM诊断模拟电路故障的方法

孙永奎¹, 陈光祜², 李 辉³

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031; 2. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054;
3. 电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

【摘要】针对低可测性模拟电路中存在的模糊组问题, 提出了一种模拟电路故障诊断的新方法。该方法首先计算被测电路网络传递函数零极点的灵敏度, 利用零极点灵敏度提供的信息来对被测电路进行模糊组的划分, 组成可诊断的元件集, 并引入了支持向量机完成对故障的分类识别。零极点的灵敏度分析确定了被测电路可诊断的元件组, 支持向量机结构简单、泛化能力强, 实验结果证明了基于灵敏度分析和支持向量模拟电路故障诊断方法的有效性, 故障诊断率大于99%。

关键词 模拟电路; 故障诊断; 零极点; 灵敏度分析; 支持向量机

中图分类号 TP181; TM930

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.016

Fault Diagnosis Method for Analog Circuits Using Sensitivity Analysis and SVM

SUN Yong-kui¹, CHEN Guang-jü², and LI Hui³

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031;

2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

3. Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A fault diagnosis method for analog circuits with low testability using sensitivity analysis and support vector machine (SVM) is presented in this paper. The transfer function poles and zeros sensitivity of circuit under test is analyzed. The ambiguity group is determined according to the poles and zeros sensitivity with respect to the components and the testable components set is obtained. The poles and zeros sensitivity analysis theoretically determines all of the diagnosable circuit components and SVM has advantages of simple structure and strong generalization ability. Experimental results prove that the proposed method for diagnosing analog circuit fault using poles and zeros sensitivity analysis and SVM is effective and the fault diagnosis accuracy of the method is more than 99%.

Key words analog circuits; fault diagnosis; poles and zeros; sensitivity analysis; SVM

模拟电路故障检测是根据已知的电路信息判断电路是否存在故障; 故障定位是在已知电路有故障的前提下, 确定故障的总数和故障元器件的位置。由于模拟电路自身的特点, 如响应的连续性、器件的容差性、电路的非线性等原因, 模拟电路的故障诊断非常复杂, 其诊断技术的发展一直比较缓慢, 至今无论在理论上还是方法上均未完全成熟。20世纪90年代以来, 随着智能技术的发展, 相继提出了基于模糊理论和神经网络^[1-2]的模拟电路故障诊断方法。然而由于模拟电路的集成度的增加和测试节点的有限, 使电路的可测性降低, 电路中存在模糊组, 从而故障不能定位到具体的元件。而上述所提的方法没有考虑被测电路中的模糊组问题, 对不可分辨的故障进行了不必要的故障定位。文献[3]提出

了使用可测性分析来确定被测电路的最优可诊断集。可测性的计算复杂度随着测试参数个数的三次方增加^[4], 随着电路的规模增大必然使可测性的计算成本增高。

支持向量机(SVM)是一种基于统计学习理论的软计算方法^[5-6]。SVM把原数据空间映射到高维的特征空间, 在特征空间中通过最大化分类间隔构造最优分类超平面, 且只需少量的支持向量表示这个最优超平面, 它克服了神经网络的不足, 在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出结构简单、全局最优、泛化能力强的优势。

本文提出了模拟电路故障诊断的支持向量机方法, 采用传递函数对被测电路进行建模, 利用其零极点的灵敏度信息确定可测元件集, 并提取相应的

收稿日期: 2007-10-19; 修回日期: 2008-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(60372001, 90407007)

作者简介: 孙永奎(1972-), 男, 博士, 主要从事模拟电路故障诊断和智能信息处理等方面的研究。

故障特征，采用SVM对电路进行故障诊断。

1 零极点灵敏度分析

被测电路的 s 域的传递函数模型为：

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{j=0}^n a_j s^j} \quad (1)$$

式中 $D(s)$ 由电路网络决定；而 $N(s)$ 取决于测试节点的选择； a_j 、 b_i 是被测电路元件函数。对式(1)进行因式分解得：

$$H(s) = K \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^n (s - p_j)} \quad (2)$$

式中 z_i 为传递函数的零点； p_j 为极点。对时域响应，传递函数的极点则影响指数瞬态响应和阻尼正弦瞬态项，响应的曲线形状则取决于零点^[7]。以 $j\omega$ 替换传递函数中的 s ，则频域响应为：

$$|H(j\omega)| = K \frac{\prod_{i=1}^m |(j\omega - z_i)|}{\prod_{j=1}^n |(j\omega - p_j)|} \quad (3)$$

$$\angle H(j\omega) = \sum_{i=1}^m \angle(j\omega - z_i) - \sum_{j=1}^n \angle(j\omega - p_j) \quad (4)$$

零极点也决定了被测电路的频域响应^[7]。

1.1 零极点灵敏度定义

被测电路的传递函数的极点函数定义为：

$$P(s) = \sum_{k=0}^n a_k s^k \quad (5)$$

式中 a_k 为电路元件函数。

零点函数定义：

$$Z(s) = \sum_{k=0}^m b_k s^k \quad (6)$$

式中 b_k 也为电路元件函数。

将 $s = p_j$ 代入式(5)并微分得：

$$\sum_{k=0}^n \left(\frac{\partial a_k}{\partial x_i} p_j^k + k a_k \frac{\partial p_j}{\partial x_i} p_j^{k-1} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial p_j}{\partial x_i} = - \frac{\sum_{k=0}^n \frac{\partial a_k}{\partial x_i} p_j^k}{\sum_{l=0}^n l a_l p_j^{l-1}} \quad (8)$$

极点灵敏度定义为^[8]：

$$S_{x_i}^{p_j} = \frac{x_i}{p_j} \frac{\partial p_j}{\partial x_i} = - \frac{x_i \sum_{k=0}^n \frac{\partial a_k}{\partial x_i} p_j^k}{p_j \sum_{l=0}^n l a_l p_j^{l-1}} \quad (9)$$

同理零点灵敏度定义为^[8]：

$$S_{x_i}^{z_j} = \frac{x_i}{z_j} \frac{\partial z_j}{\partial x_i} = - \frac{x_i \sum_{k=0}^n \frac{\partial b_k}{\partial x_i} z_j^k}{z_j \sum_{l=0}^n l b_l z_j^{l-1}} \quad (10)$$

1.2 模糊组分析

在低可测电路中，模糊组是指不能区分故障元件的集合。电路元件发生故障时，其值的变化必然对零极点产生影响，因此通过传递函数的零极点灵敏度来定义模糊组。

定义 1 如果电路元件 x_i 和 x_j 的极点灵敏度相同，则 x_i 、 x_j 属于同一极点模糊组。

定义 2 如果电路元件 x_i 和 x_j 的零点灵敏度相同，则 x_i 、 x_j 属于同一零点模糊组。

定义 3 如果电路元件 x_i 和 x_j 的极点灵敏度相同，且零点灵敏度也相同，则 x_i 、 x_j 属于全局模糊组。如果 x_i 和 x_j 属于同一的极点模糊组，而 x_i 和 x_j 属于不同的零点模糊组，则 x_i 、 x_j 属于不同的全局模糊组。

文献[8-9]研究了零极点灵敏度的计算方法，其计算复杂度为被测参数个数的一次方。与文献[4]相比，基于零极点灵敏度的模糊组确定方法有优势。

2 SVM原理

SVM首先利用内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维空间，在这个空间中求最优分类面。SVM分类函数形式上类似于一个神经网络，输出是中间节点的线性组合，每个中间节点对应一个支持向量，如图1所示，由两层构成，在学习过程中，第一层由核定义的集合中选择核函数 $k(x_i, x)$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ；第二层构造一个线性函数，即构造一个最优超平面^[5-6]。

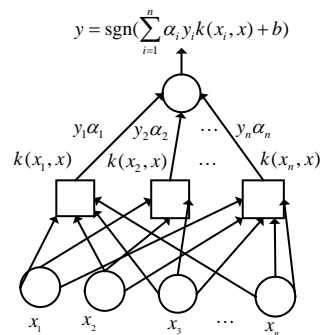


图1 SVM结构

单个SVM只能解决二分类问题, 对于多分类问题的求解, 主要有3种组合SVM方法: 一对多法、一对一法和决策导向无环图。文献[10]研究了这3种组合SVM方法的性能特点, 其中一对一法多分类具有优势。一对一法SVM求解 K 类问题, 任意两类样本都需构造1个SVM, 共需构造 $k(k-1)/2$ 个SVM, 采用投票决策法判别测试样本 x 的类别, 即样本 x 属于得票数最多的类别。

3 灵敏度分析和SVM故障诊断方法

选择测试节点, 进行零极点的灵敏度分析, 确定可诊断的元件集, 提取可诊断故障特征构成SVM训练样本, 用交叉验证搜索法^[11]对SVM的参数 C 和高斯核函数参数 γ 进行优化。SVM参数确定方法实现如下: 选定1组 C 、 γ 的范围, 对应范围上的每一组 C 、 γ 的值, 按照交叉验证法计算出预测准确率, 最后比较各组准确率, 从而确定最佳 C 、 γ 值。灵敏度分析和SVM诊断模拟电路故障方法如图2所示。

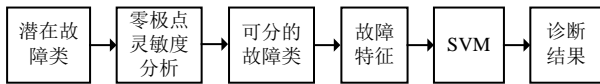


图2 灵敏度分析和SVM诊断模拟电路故障的方法

4 实验和结果分析

以模拟和混合信号测试标准电路^[12]中的CTSV滤波器电路为诊断实例, 电路如图3所示, 元件标称值为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 10\text{ k}\Omega$ 、 $R_6 = 3\text{ k}\Omega$ 、 $R_7 = 7\text{ k}\Omega$ 、 $C_1 = C_2 = 20\text{ nF}$ 。为了与文献[3,13]相比较, 设每个器件具有1%的容差, 并假设该电路中无源器件发生单个软故障, 且发生故障时, 该器件的值为 $X_n \pm X_n 10\%$, $X_n \pm X_n 20\%$, $X_n \pm X_n 50\%$, X_n 是器件的标称值。

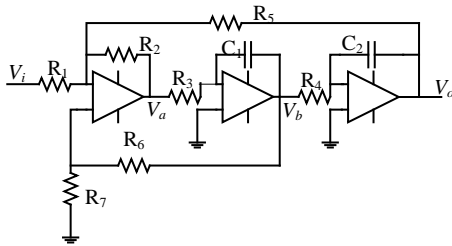


图3 CTSV滤波器电路

4.1 零极点灵敏度分析和模糊组的确定

图3中, V_o 为测试节点, CTSV滤波器电路的传递函数为:

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{-2.5 \times 10^7}{s^2 + 4\,500s + 2.5 \times 10^7} \quad (11)$$

式(11)的极点为 $p_1 = -2\,250 + 4\,465.1i$ 和 $p_2 = -2\,250 - 4\,465.1i$, 极点灵敏度如表1所示。因为没有零点, 极点模糊组即为全局模糊组, 表1的结果表示 R_3 和 C_1 的极点灵敏度相同以及 R_4 和 C_2 的极点灵敏度相同, 其他的元件的极点灵敏度互不相同, 所以选择 V_o 为测试节点, CTSV电路模糊组的划分为如表2所示, 电路的可测元件集为: R_1 、 R_2 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 $[R_3, C_1]$ 、 $[R_4, C_2]$ 。

表1 极点灵敏度

x_i	$S_{x_i}^p$	$S_{x_i}^{p_2}$
R_1	0.001 6-0.169 1 i	0.001 6+0.169 1 i
R_2	0.501 6+0.083 3 i	0.501 6-0.083 3 i
R_3	-0.500 0-0.252 5 i	-0.500 0+0.252 5 i
R_4	-0.500 0+0.252 5 i	-0.500 0-0.252 5 i
R_5	-0.500 0+0.084 2 i	-0.500 0-0.084 2 i
R_6	0.000 5+0.353 2 i	0.000 5-0.353 2 i
R_7	0.001 1-0.354 0 i	0.001 1+0.354 0 i
C_1	-0.500 0-0.252 5 i	-0.500 0+0.252 5 i
C_2	-0.500 0+0.252 5 i	-0.500 0-0.252 5 i

表2 可测节点 V_o 的模糊组

模糊组	1	2	3	4	5	6	7
元件	R_1	R_2	R_3, C_1	R_4, C_2	R_5	R_6	R_7

4.2 故障诊断

选择 R_1 、 R_2 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 C_1 、 C_2 作为可测元件集中的典型元件。对电路的每种状态分别进行50次Monte Carlo仿真, 提取时域和频域响应为故障特征, 时域的激励为阶跃信号, 组成SVM的训练样本。对电路每个潜在的故障和正常状态分别进行200次Monte Carlo仿真, 作为SVM的测试样本。

采用一对一法训练SVM, 其参数 $C = 2$ 、高斯核函数参数 $\gamma = 0.5$ 。

表3、表4分别是时域故障特征和频域故障特征的诊断结果。

表3和表4中, 第一行表示待诊断的故障元件, 第一列表示待诊断元件的故障值, F_0 为无故障类、 F_1 为 $[R_1]$ 故障类、 F_2 为 $[R_2]$ 故障类、 F_3 为 $[R_3, C_1]$ 故障类、 F_4 为 $[R_4, C_2]$ 故障类、 F_5 为 $[R_5]$ 故障类、 F_6 为 $[R_6]$ 故障类、 F_7 为 $[R_7]$ 故障类。表3中对 R_3 、 C_1 和 R_4 、 C_2 分别诊断为同类故障的平均故障诊断率大于98%, 对所有故障的平均故障诊断率大于99%。表4中频域故障特征的诊断结果均为100%; R_3 、 C_1 和 R_4 、 C_2 分别诊断为同类故障。

表3 时域特征的诊断结果

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2
$X_n \pm 1\% X_n$	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]
$X_n - 10\% X_n$	200 [F_1]	195 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_3]	190 [F_6]	199 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n + 10\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	190 [F_4]	200 [F_3]	191 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	195 [F_4]
$X_n - 20\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	195 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_3]	198 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	187 [F_4]
$X_n + 20\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	193 [F_4]	200 [F_3]	197 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	192 [F_4]
$X_n - 50\% X_n$	200 [F_1]	196 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_3]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n + 50\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	195 [F_4]	200 [F_3]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]

表4 频域特征的诊断结果

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2
$X_n \pm 1\% X_n$	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]	200 [F_0]
$X_n - 10\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n + 10\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n - 20\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n + 20\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n - 50\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]
$X_n + 50\% X_n$	200 [F_1]	200 [F_2]	200 [F_3]	200 [F_4]	200 [F_5]	200 [F_6]	200 [F_7]	200 [F_3]	200 [F_4]

文献[3-13]中均采用了CTSV滤波器电路作为诊断实例, 本文的诊断结果与文献[3-13]的对比结果如表5所示。

表5 比较结果

诊断实例	故障类数	准确率/(%)
本文(时域特征)	8	≥ 99
本文(频域特征)	8	100
文献[3](时域特征)	7	100
文献[13](频域特征)	7	97.5

表5中本文所提方法的诊断准确率高于文献[13]的结果, 采用时域特征略低于文献[3]的结果, 而采用频域特征的结果和文献[3]相同, 而文献[3-13]均把 R_6 、 R_7 为一个故障类, 本文的方法能识别 R_6 、 R_7 作为不同的故障类。

5 结论

本文针对低可测模拟电路提出了一种故障诊断的方法, 该方法首先分析被测电路传递函数零极点的灵敏度, 其次根据电路元件对零极点灵敏度值的信息来确定可测元件集和模糊组, 最后提取电路特征, 采用SVM对被测电路进行故障诊断。与文献[3]所提的方法相比, 采用零极点灵敏度来确定被测电路的可测元件集和模糊组在计算复杂度上有优势。SVM具有简单的结构, 强的泛化能力, 使得该方法

比其他的方法更加有效。以CTSV滤波器电路^[13]为诊断实例, 其诊断准确率高于99%, 实验的结果表明该方法对模拟电路故障诊断具有更好的适应性和诊断性能。

参 考 文 献

- [1] WANG P, YANG S. A new diagnosis approach for handling tolerance in analog and mixed-signal circuits by using fuzzy math[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2005, 52(10): 2118-2127.
- [2] 王 承, 陈光祜, 谢永乐. 多层感知机在模拟/混合电路故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(6): 578-581.
WANG Cheng, CHEN Guang-ju, XIE Yong-le. Applying MLPS to fault diagnosis in analog and mixed-signal circuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(6): 578-581.
- [3] CANNAS B, FANNI A, MANETTI S, et al. Neural network-based analog fault diagnosis using testability analysis[J]. Neural Computing & Applications, 2004, 13(4): 288-298.
- [4] STARZYK J A, PANG J, MANETTI S, et al. Finding ambiguity groups in low testability analog circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(8): 1125-1137.
- [5] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.

(下转第992页)